

文章编号:1001-9014(2004)02-0139-04

一种全局优化的多面体凸分解匹配方法

刘文予, 李华

(华中科技大学电子与信息工程系图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:提出了一种全局优化的多面体匹配方法,该方法对物体的拓扑关系和结构关系进行多级匹配.利用全局优化的松弛迭代方法减少匹配误差,并由匹配的一致性准则进行匹配结果的检测,根据物体的内在特征来进行匹配,从而解决非同构物体的匹配.可广泛应用于物体识别、三维物体重建、医学图像处理等领域,实验证明此方法质量好、自动化程度高,是一种有效的全局优化结构匹配方法.

关键词:多面体;匹配;松弛迭代;全局优化;凸分解

中图分类号:TP391.41;TP751.1 **文献标识码:**A

GENERAL OPTIMIZATION METHOD OF POLYHEDRON CONVEX DECOMPOSING MATCHING

LIU Wen-Yu, LI Hua

(Dept. of Electronics & Information Engineering, key laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligent control, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: By decomposing polyhedron each into a set of several individual convex sub-sets. A general optimization matching method was proposed. The matching process was divided into two steps for optimal mapping: topologic relationship matching and structure relationship matching. And the relax iteration was used to reduce the matching error. This method can solve the morbid problem of two non-homotopic objects matching. The experiments show that the method is a topologic relationship matching and it can be widely used in objects recognition, 3D object construction and medical image analysis.

Key words: polyhedron; matching; relax iteration; general optimization; convex decomposing

引言

多面体或多边形的匹配在物体识别、三维物体重建、物体变形中有广泛的应用^[1].早期的匹配大多是在二维空间内进行,主要方法有 Asada^[2]和 Hui^[3],这些方法主要集中于多边形和曲线上的点或边的匹配,他们把多边形的整体划分为一个个的局部进行匹配,并且匹配过程中只考虑外轮廓的边界不考虑内部的边界(如孔洞等),因此不能达到全局的最优匹配.近期的一些作者为克服上面的问题,大多是先对物体的形状进行描述,在描述的基础上进行匹配^[4-6].这种描述方法称为形状元素,形状元素必须满足下列3个条件^[5]:1)形状元素不受平

移,旋转和尺度变换的影响;2)对形状元素的局部修改不会影响形状元素的主体;3)物体形状的小变化不会产生形状元素的较大变化;不幸的是,找到一个满足上述3个条件的形状元素非常困难.

目前,物体的骨架被认为是一种较好的形状元素,物体的骨架携带有物体的所有信息.但骨架在物体的形状描述及匹配中表现出下列不足之处:(1)对噪声敏感,边界上小的扰动会引起骨架结构的较大变化;(2)不可能由2个物体的骨架直接导出它们之间的相似性度量;(3)不可能由骨架直接表示与边界凸凹有关的形状特性.(4)精确的骨架点与物体的拓扑结构之间是一对矛盾.基于欧氏距离的方法能确定骨架点,但这经常要以改变物体的拓扑

收稿日期:2003-06-24,修回日期:2003-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60273099,69973018)

作者简介:刘文予(1963-),男,湖南株洲人,教授,博导.主要从事计算机视觉,计算机图形学,多媒体信息处理等研究.

Received date: 2003-06-24, revised date: 2003-10-12

结构为代价;文献[7]为了保证骨架提取过程的稳定性,在传统骨架的基础上定义了一个新的骨架——固定拓扑骨架,它非常适用于分割和物体的定位.文献[1]中提出一种基于三角剖分的近似骨架方法,用于二维多边形,但不能解决多边形中存在孔的问题并且不能用于三维物体.为了克服上述问题,我们提出了一种全局优化的匹配方法,该方法对物体的拓扑关系和结构关系进行多级匹配.利用全局优化的松弛迭代方法减少匹配误差,并由匹配的一致性准则进行匹配结果的检测,根据物体的内在特征来进行匹配,从而达到某种特殊要求.实验证明此方法主观质量好、自动化程度高.

1 凸子集的全局优化松弛迭代匹配原理

由于非凸集分析的复杂性,多面体或多边形的匹配过程一般为首先对物体进行凸剖分,对凸物体进行匹配,非同态物体间的凸物体匹配并不是简单的形状、位置匹配,而与凸物体在物体中的相对位置、结构关系及拓扑关系有关,因此选择合适的结构化匹配方法是实现良好匹配的前提.本文利用一种对任意多面体不添加顶点的凸剖分方法^[10],从多面体的棱和对角棱(就是多面体任意一表面的对角线)所构成的所有环中按一事实上的要求选取一个最好的环,利用这个环的各个边所形成的一系列面对多面体进行剖分.这种方法可使对多面体的剖分数接近最少,并适用于多种多面体(如有孔多面体)和多边形.

设物体 A 包括 K 个不连通的部分,每一部分称为连通分量 $D'_k, 1 \leq k \leq K$; 物体 B 包括 L 个不连通的部分,每一部分称为连通分量 $D''_l, 1 \leq l \leq L$.

把 A 最大剖分成 m 个不相交的凸子集 A_1, A_2, \dots, A_m , 把 B 最大剖分成 n 个不相交的凸子集 B_1, B_2, \dots, B_n .

即 $A = A_1 \cup A_2 \dots \cup A_m, A_i \cap A_j = \Phi (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq m)$,

$B = B_1 \cup B_2 \dots \cup B_n, B_i \cap B_j = \Phi (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n)$.

由于 m 与 n 不相等,匹配是一对多和多对一的关系,则 A 中的任一凸子集按某种最短距离原则与 B 中的任一凸子集在 A 中都有像.为使后面的识别和三维重建中不出现病态,各凸子集匹配不能自相交.

定义 1 对 A, B 的所有凸子集 $A_i (1 \leq i \leq m)$ 和 $B_j (1 \leq j \leq n)$, 如果 i, j 匹配, 则称 A_i 与 B_j 存在映射

关系,所有的映射关系称为 A, B 的凸分解匹配.

凸分解匹配可用公式表示为

$$\min \sum \|A_i - B_j\| \text{ 且 } A_i (1 \leq i \leq m) \text{ 和 } B_j (1 \leq j \leq n) \text{ 的匹配不能自相交}$$

对所有 i, j 存在映射关系

(1)

式中 $\|\cdot\|$ 表示距离,这种匹配是结构关系的匹配,我们通过下面介绍的二级匹配方法解决.

取物体 A, B 的最小立方体边界盒.令最小边界盒的左下角顶点为坐标原点,建立坐标系,设凸子集 A_i 的重心为 (x, y, z) , 连接原点与重心, 形成一个矢量, 称为此凸子集的坐标矢量, 记为 \vec{r}_{A_i} , 为了不同大小的凸子集能进行比较, 做归一化处理, 即把最小边界盒的最长边变换到 1.

由于 A 中可以有不止一个凸子集(如图 2 中所示的汉字“三”), 匹配分二步进行. 首先进行连通分量匹配. 前述设 A 有 K 个连通分量, B 有 L 个连通分量, 将 A 中的任一连通分量按最短距离原则与 B 中的某个连通分量对应, 同样 B 的任一连通分量在 A 中也有像, 从而将凸子集的映射限制于 2 个匹配的连通分量中. 例如, 若 A 中的连通分量 D'_k 和 B 中的连通分量 D''_l 匹配, 即是说 D''_l 与 D'_k 相对应.

非同态物体间的凸物体匹配并不是简单的形状、位置的匹配, 而与凸物体在物体中的相对位置、结构关系及拓扑关系有关, 我们采用松弛迭代匹配法实现全局优化的连通分量匹配.

记 h 为一个连通分量的凸包, 凸包的属性定义为一个三元组 (p, v, t) , p 为凸包的重心坐标 (x, y, z) , v 为凸包体积, t 为记载凸包中 x, y, z 坐标的最大最小值.

设凸包 $h_1 = (p_1, v_1, t_1), h_2 = (p_2, v_2, t_2)$, 则 h_1, h_2 的相似度定义为 $m(h_1, h_2), 0 \leq m(h_1, h_2) \leq 1$, 有

$$m(h_1, h_2) = w_1 s_1 + w_2 s_2 + w_3 s_3, \quad (2)$$

式(2)中 w_i 是权系数, $\sum w_i = 1$. 由大量实验可得, $w_1 = 0.3, w_2 = 0.4, w_3 = 0.3$.

定义 $s_1 = 1 - \frac{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}{(x_1 + y_1 + z_1)^2 + (x_2 + y_2 + z_2)^2}$

, 其中 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$ 分别为 h_1, h_2 的重心.

定义 $s_2 = 1 - \frac{|v_1 - v_2|}{\max(v_1, v_2)}$, v_1, v_2 为 h_1, h_2 的体积.

设凸包 h_1 中 $x \in [x'_1, x'_2], y \in [y'_1, y'_2], z \in [z'_1, z'_2]$, 凸包 h_2 中 $x \in [x''_1, x''_2], y \in [y''_1, y''_2], z \in [z''_1, z''_2]$, 有 $d_1 = |x'_1 - x''_1|, d_2 = |x'_2 - x''_2|, d_3 = |y'_1 - y''_1|, d_4 = |y'_2 - y''_2|, d_5 = |z'_1 - z''_1|, d_6 = |z'_2 - z''_2|$

$-z''_2|$.

定义 $s_3 = 1 - d_1 d_2 d_3 d_4 d_5 d_6$

若 h_1 和 h_2 匹配,则至少有 3 个 $d_i (1 \leq i \leq 6)$ 取得极小值,此时 s_3 取得极大值.

由 $m(h_1, h_2)$ 建立相似矩阵 $S_{K \times L}(i, j, num)$, num 为迭代次数. 具体的松弛迭代匹配算法如下:

1) 对相似矩阵按下述公式(3)进行归一化处理;

$$S_{K \times L}(i, j, 0) = S_{K \times L}(i, j, 0) / \max \{ \max_{1 \leq r \leq L} S_{K \times L}(i, r, 0), \max_{1 \leq h \leq K} S_{K \times L}(h, j, 0) \}, \quad (3)$$

取 $num = 1$.

2) 按下述公式(4)进行迭代;

$$S_{K \times L}(i, j, num) = \sum_{h \neq i} \{ \max_{r \neq j} S_{K \times L}(h, r, num - 1) \} \times S_{K \times L}(i, j, num - 1) / (K - 1) \quad (4)$$

3) 对 $S_{K \times L}(i, j, num)$ 按公式(3)进行归一化处理;

4) 若 $S_{K \times L}(i, j, num)$ 大于某个阈值 $T = 0.05$, 则 $S_{K \times L}(i, j, num)$ 保留, 并置 $S_{K \times L}(i, j, num) = 0$; 否则置 $S_{K \times L}(i, j, num) = 0$; (5) 令 $num = num + 1$, 回到第二步.

上述迭代中一般取 $num = 5$. 同理, 建立相似矩阵 $S_{L \times K}(j, i, num)$, 按下列公式进行松弛迭代:

$$S_{L \times K}(j, i, num) = \sum_{h \neq j} \{ \max_{r \neq i} S_{L \times K}(h, r, num - 1) \} \times S_{L \times K}(j, i, num - 1) / (K - 1). \quad (5)$$

对 B 中的 D''_l 在 A 中仅有 D'_k 与之对应匹配. 若 $S_{L \times K}(l, k, num)$ 大于阈值 T , 则置 $S_{L \times K}(l, k', num) = 0$, 其中 $k \neq k'$. 因此, 如果 D'_k 和 D''_l 对应, 则 $S_{K \times L}(i, j, num)$ 和 $S_{L \times K}(j, i, num)$ 的最大值大于阈值 T .

连通分量匹配完成后, 需进行凸子集的匹配. 设凸子集 $A_i \subseteq D'_k, B_j \subseteq D''_l$, 找 A_i 的对应关系 B_j , 若

$$|\vec{r}_{A_i} - \vec{r}_{B_j}| = \min_{\text{对 } D''_l \text{ 中所有 } \vec{r}} (|\vec{r}_{A_i} - \vec{r}|), \quad (6)$$

成立, 记为关系 (i, j) , 显然 $(i, j) = (j, i)$. 所有凸子集的匹配对应关系构成匹配关系表 R .

在连通分量匹配结果的约束下, 对匹配关系表

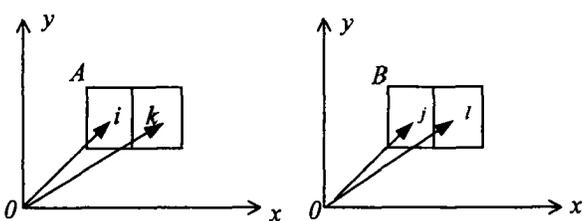


图1 一致性检验示意图
Fig.1 The draft of checkout for coherence matching

R 还需做一致性检验, 即避免匹配中自相交的出现. 如图1所示, 如果有匹配对应关系 $(i, j), (k, l)$, 若 $\vec{r}_{A_i}, \vec{r}_{B_j}$ 围成的三角形与 $\vec{r}_{A_k}, \vec{r}_{B_l}$ 围成的三角形重叠部分最小, 称为关系一致, 否则称为关系不一致, 不一致的对应关系会造成病态的匹配, 通常经过松弛迭代匹配后, 不一致的情况极少发生.

凸子集的映射算法如下:

1) 根据连通分量的匹配关系把 A_i, B_j 分类, 某一类的凸子集只能与另一类的凸子集匹配.

2) 对每一个 A_i , 找出对应匹配类中的某个 B_h , 使公式(6)成立, 则有关系 (i, h) , 加入关系表 R 中, 同时把 B_h 找上标记.

3) 对 B 中没有打上标记的每一个 B_j , 找对应匹配类中的某个 A_l , 使公式(6)成立, 则有关系 (l, j) , 把 (l, j) 加入关系表 R 中. 表 R 即为 i, j 的所有映射关系

3 实验结果与结论

图2所示为2个手写体的“三”字, A 有3个连通分量 A_1, A_2, A_3, B 有2个连通分量 B_1, B_2 , 其中 A_1 分解为4个凸子集, A_2 分解为4个凸子集, A_3 分解为4个凸子集, B_1 分解为7个凸子集, B_2 分解为2个凸子集. 连通分量的迭代匹配结果是 A_1 与 B_1 匹配, A_2 与 B_1 匹配, A_3 与 B_2 匹配, 在此基础上, 根据式(6)再进行凸子集的匹配, 可求得如图2(c)所示的关系表 R , 其中符号 \leftrightarrow 表示匹配. 图2为 A, B 对应匹配关系图.

图3为2个非同构多边形 A, B , 这在由切片重建三维物体中非常常见. 多边形 A 有孔, 剖分成10个多边形, B 剖分成6个多边形, 采用全局优化迭代的方法匹配结果见图3(c), 符号 \leftrightarrow 表示匹配. 多面体的情况同样成立.

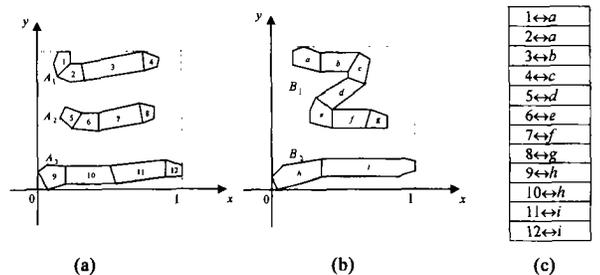


图2 2个多边形(a)、(b)的凸剖分及连通分量、凸子集的匹配, (c)为(a)、(b)的凸子集匹配关系表 R
Fig.2 (a)(b)convex decomposing and connected component of two original polygons. (c) the convex subsets matching results of (a) and (b)

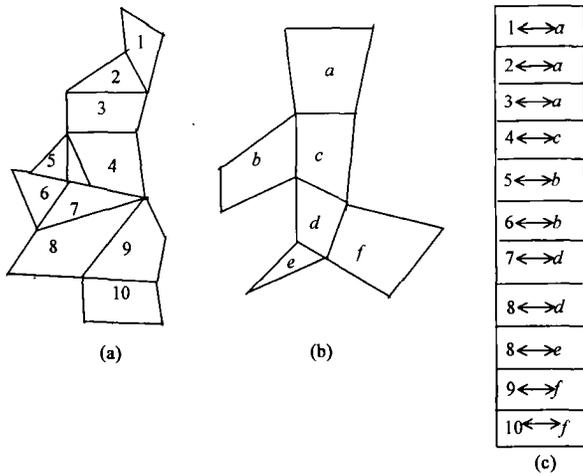


图3 2个非同构多边形的全局优化迭代匹配结果
Fig.3 The results of two non-homotopic polygons general optimization matching

本文提出了一种全局优化的匹配方法,该方法对物体的拓扑关系和结构关系进行二级匹配.利用全局优化的松弛迭代方法减少匹配误差,并由匹配的一致性准则进行匹配结果的检测,根据物体的内在特征来进行匹配,从而达到某种特殊要求.目前拓扑关系和结构关系的匹配结果还没有一种定量评价方法,主要通过人的主观评价方法,本文的方法可应用于物体识别、三维物体重建^[9]、医学图象处理等领域以及物体变形等领域^[10],实验证明此方法主观质量好、自动化程度高,是一种有效的全局优化匹配方法.

REFERENCES

- [1] Mortara M, Spagnuolo M. Similarity measures for blending polygonal shapes[J]. *Computers & Graphics*, 2001, **25**(2): 13—27
- [2] Asada H, Brady M. The curvature primal sketch[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(1): 2—14
- [3] Hui K C, X Yadong-Li. A feature based shape blending technique for industrial design[J]. *Computer Aided Design*, 1998, **30**(10): 823—834
- [4] Barequet G, Shapiro D. Multilevel sensitive reconstruction of polyhedral surfaces from parallel slices[J]. *The Visual Computer*, 2000, **16**: 116—133
- [5] Pelillo A, Siddiqi K, Zucker S W. Matching hierarchical structures using association graphs[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, **21**(11): 1105—1119
- [6] De Martino M, Ferrino M. An example of automated shape analysis to solve human perception problems in anthropology [J]. *International Journal of Shape Modeling*, 1996, **2**(1): 69—84
- [7] Golland P, et al. Fixed topology skeletons[C]. In: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York: IEEE Press, 2000, 1: 10—17
- [8] Wang Fei, LIU WenYu. A fast algorithm for object convex decomposition. In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics*. Kuming: International Academic Publishers, 2001, 298—301
- [9] LIU Wen-Yu, ZHU Guang-Xi. 3D Object construction from slice based on generalized morphologic transformation[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (刘文宇, 朱光喜. 基于广义形态变换的由切片重建三维物体方法. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(3): 225—228
- [10] Liu Wen Yu, Li Hua, ZHU GuangXi. Non-rigid Body Interpolation Based on Generalized Morphologic Morphing[J]. *International Journal of Image & Graphics*, 2003, **3**(2): 325—344